

**Marché de service**

**Pouvoir adjudicateur : Commission de Gestion du Parc naturel**

**Haute-Sûre Forêt d'Anlier ASBL**

## **Suivi de l'impact hydromorphologique du démontage de barrages de castor sur la Sûre**

### **Rapport final**

### **Décembre 2020**

**Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale  
LHGF – ULiège**

**Q. Vaessen, A. Peeters, J. Van Campenhout, G. Houbrechts**

# TABLE DES MATIÈRES

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUCTION.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2. MÉTHODOLOGIE.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2.1. Granulométrie et quantification du volume de sédiments fins piégés dans les retenues.....</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1.1. TAILLE DES ÉLÉMENTS FINS PIÉGÉS.....  | 6         |
| 2.1.2. MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE SÉDIMENTS PIÉGÉS .....   | 7         |
| <b>2.2. Hydrogramme et mesure du débit par jaugeage .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>2.3. Mesures de concentrations en MES durant les opérations de démantèlement et estimation du volume de sédiments relâchés .....</b>          | <b>10</b> |
| <b>2.4. Évaluation du colmatage à court et moyen terme .....</b>   | <b>12</b> |
| 2.4.1. STICKS HYPOXIES.....  | 12        |
| 2.4.2. PIÈGES À SÉDIMENTS .....  | 12        |
| <b>2.5. Effet des démantèlements sur la progression de la vague sédimentaire des galets piégés dans les retenues.....</b>                        | <b>13</b> |
| <b>3. RÉSULTATS .....</b>  | <b>14</b> |
| <b>3.1. Quantification des volumes de sédiments fins piégés dans les retenues .</b>  | <b>14</b> |
| <b>3.2. Hydrogramme et mesure du débit.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>3.3. Évolution des concentrations en MES en aval des barrages durant les opérations de démantèlement et estimation du volume libéré .....</b> | <b>17</b> |
| AVANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT .....   | 17        |
| PENDANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT : À L'AVAL DIRECT DU BARRAGE 3 (P1) .....   | 17        |
| PENDANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT : SUR L'ENSEMBLE DU SECTEUR AVAL ÉTUDIÉ.....  | 20        |
| APRÈS LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT .....   | 21        |
| BILAN DU VOLUME DE SÉDIMENTS RELARGUÉS .....   | 21        |
| <b>3.4. Évaluation du colmatage à court terme et moyen terme .....</b>   | <b>23</b> |
| STICKS HYPOXIES .....  | 23        |
| PIÈGES À SÉDIMENTS FINS.....   | 26        |
| <b>3.5. Effet des démantèlements sur la progression des galets piégés dans les retenues.....</b>   | <b>30</b> |
| <b>4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES .....</b>   | <b>32</b> |
| <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>  | <b>35</b> |

## 1. INTRODUCTION

Le site d'étude se situe dans la commune de Léglise, à proximité du village de Volaiville en Province du Luxembourg. Il est situé sur la Sûre à moins de 15 km de la source (bassin versant : 36 km<sup>2</sup>), en amont de la confluence entre la Sûre et son premier affluent conséquent, la Géronne (bassin versant : 34 km<sup>2</sup>). Le secteur appartient à la masse d'eau ML08R visée par l'objectif « très bon état » écologique de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) de par la présence de la moule perlière (*Margaritifera margaritifera*).

En 2015, un castor (*Castor* sp) a construit un premier barrage (n°1) sur un tronçon rectifié de la Sûre au niveau du site d'étude (figures 1 et 2). Directement en amont de ce barrage, le castor a creusé une tranchée déviant la majeure partie du débit vers une mare créée en 2011 dans l'ancien tracé du lit mineur de la rivière en rive droite. Le débit dévié s'échappe ensuite de la mare en se dispersant par de multiples petits chenaux creusés par le castor et par le ruissellement. L'eau s'écoule dans cette zone au travers d'une succession d'élargissements (mares) et de rétrécissements (chenaux de déversement). L'écoulement rejoint un ancien drain qui rejoint le cours principal de la Sûre. Ce système constitue ainsi un bras de contournement du cours principal de la Sûre (bief, sur la figure 1). Un second barrage (n°2) a été édifié par le castor sur ce bief, à proximité de sa confluence avec la Sûre. Finalement, un troisième barrage (n°3) a été établi sur le cours principal de la Sûre en aval direct de cette confluence.

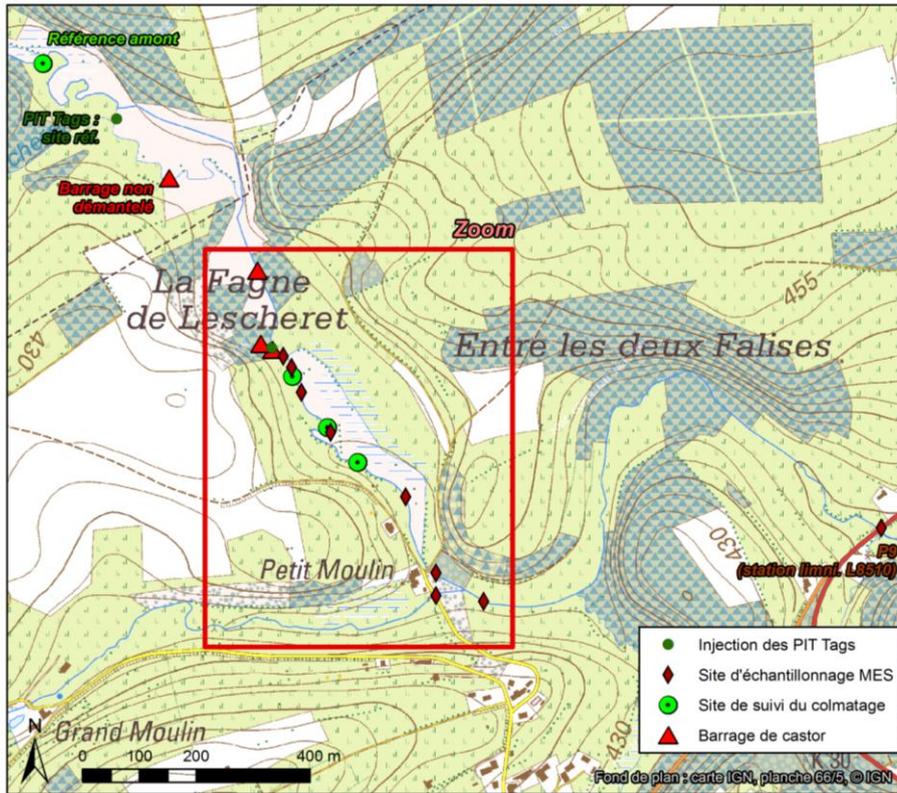


Figure 1 Localisation des sites d'étude

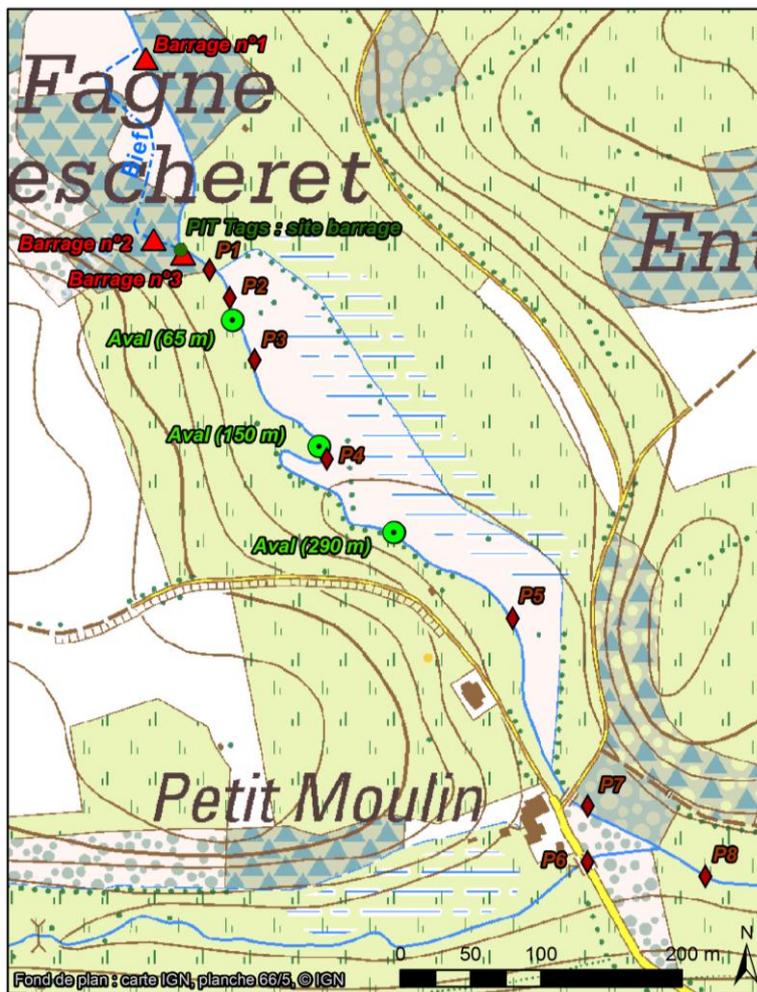


Figure 2 Localisation des sites d'étude (zoom)

Les barrages ont été supprimés en prévision des travaux de reméandration sur le site (été 2020) qui visent une amélioration de la qualité hydromorphologique pour atteindre les objectifs de la DCE. Le site présente de forts enjeux environnementaux du fait de la présence de deux mollusques bivalves protégés : la moule perlière (*Margaritifera margaritifera*) et la moule épaisse (*Unio crassus*). La présence de ces espèces a justifié une dérogation pour la destruction des barrages de castor qui est une espèce protégée au même titre que les deux bivalves précédemment cités. Le principal problème concerne la moule perlière qui est fortement sensible aux matières en suspension (MES) dans l'eau et au colmatage du substrat résultant de l'infiltration des sédiments fins dans la sous-couche. Ce phénomène de colmatage est également suspecté d'affecter la moule épaisse. Ainsi, par exemple, la suppression des retenues pourrait engendrer une vague sédimentaire (de MES ou de galets piégés dans les retenues) qui pourrait détruire les zones d'habitat en aval. Dans ce cadre, l'étude de l'impact du démantèlement des barrages est d'une importance fondamentale pour la préservation des moules d'eau douce et de leur habitat. Or, il n'existe pas à notre connaissance d'études d'impact du relargage des sédiments suite à l'effacement de barrages de castor, et *a fortiori* dans le cadre de ce type d'enjeux environnementaux.

Le présent rapport décrit le protocole mis en place pour évaluer l'impact lié à la mobilisation de sédiments lors de l'opération de démantèlement et immédiatement après travaux, ainsi que les résultats de cette étude concernant les impacts sur l'habitat à moyen terme.

## 2. MÉTHODOLOGIE

La méthode de travail mise en œuvre a pour objectif de documenter l'impact du démantèlement des barrages de castor sur les habitats des moules d'eau douce.

Afin d'évaluer l'effet du relargage des sédiments sur les habitats, le protocole mis en place porte sur (i) la quantification des volumes de sédiments fins piégés dans les retenues, (ii) sur les mesures de concentrations en MES en aval des barrages durant les opérations de démantèlement, (iii) sur l'évaluation du colmatage à court (phase 1 de l'étude) et à moyen terme (phase 2 de l'étude), et (iv) sur l'effet des démantèlements sur la progression de la vague sédimentaire des galets piégés dans les retenues.

### 2.1. Granulométrie et quantification du volume de sédiments fins piégés dans les retenues

#### 2.1.1. TAILLE DES ÉLÉMENTS FINS PIÉGÉS

Dans le cadre de ce suivi, il n'était pas prévu de réaliser une analyse granulométrique des dépôts piégés en amont des barrages. Toutefois, des analyses réalisées dans le bassin de la Lienne (Lienne et Chavanne) sur des dépôts similaires dans des retenues de barrage de castor montrent que le  $D_{50}$  des dépôts est de l'ordre de 20-40  $\mu\text{m}$  et le  $D_{99}$  se situe dans la plupart des cas en-dessous de 500  $\mu\text{m}$  (Houbrechts *et al.*, 2013). Ces échantillons se placent donc dans l'Image de Passega (1957, 1964) dans la zone de décantation (ensemble T) et au début de la suspension homogène (segment SR) (cf. figure 3). Cela signifie donc que ces éléments peuvent facilement être remobilisés et transportés en suspension homogène (segment SR) lorsque la perturbation liée à la présence du barrage de castor est supprimée et que l'écoulement de la rivière n'est plus perturbé. D'après les courbes de Hjülstrom (1935), la vitesse critique d'érosion des éléments de 500  $\mu\text{m}$  n'est que de 30 cm/s. Cette vitesse est atteinte pour des débits fréquents et les sédiments déposés dans la retenue peuvent alors être emportés sur de longues distances en suspension homogène.

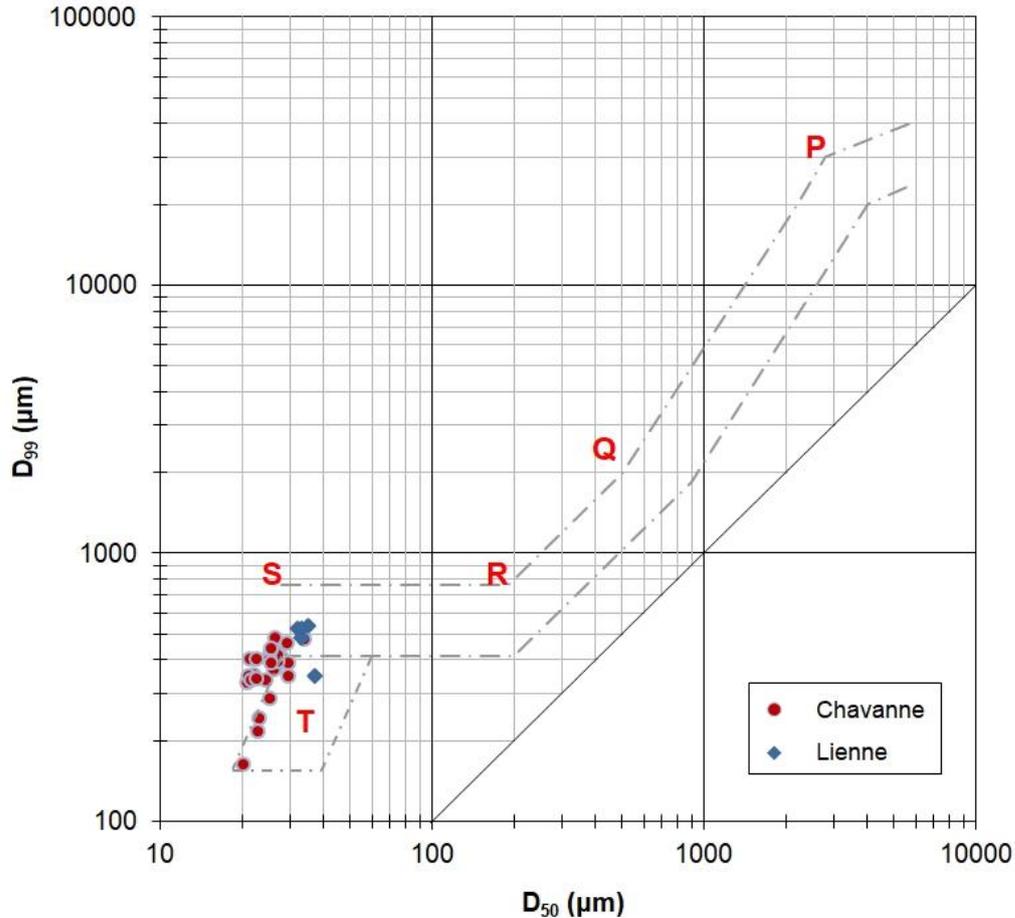


Figure 3 Granularité des dépôts dans des barrages de castor représentés sur une Image CM de Passega (d'après Houbrechts *et al.* 2013)

### 2.1.2. MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE SÉDIMENTS PIÉGÉS

Les sédiments piégés dans les retenues ont été quantifiés sur base de la mesure de leur épaisseur et du calcul de la surface affectée par la présence des sédiments fins. Pour ce faire, les mesures d'épaisseur sont réalisées le long de profils en travers, à raison de 3 mesures par profil (pied de berge gauche, milieu du lit et pied de berge droit), et dont l'inter-distance entre profils est de 10 m. Davantage de mesures sont réalisées à proximité directe du barrage.

L'épaisseur de la couche de sédiments est évaluée par la prise de mesure des limites supérieure et inférieure de la couche de vase (après enfoncement d'une barre métallique graduée). Pour la mesure de la limite supérieure de la vase, la barre graduée est posée sur un socle plat, ce qui évite l'enfoncement de la barre graduée dans la vase. Nous estimons que la précision de cette méthode est de l'ordre de 2 cm.

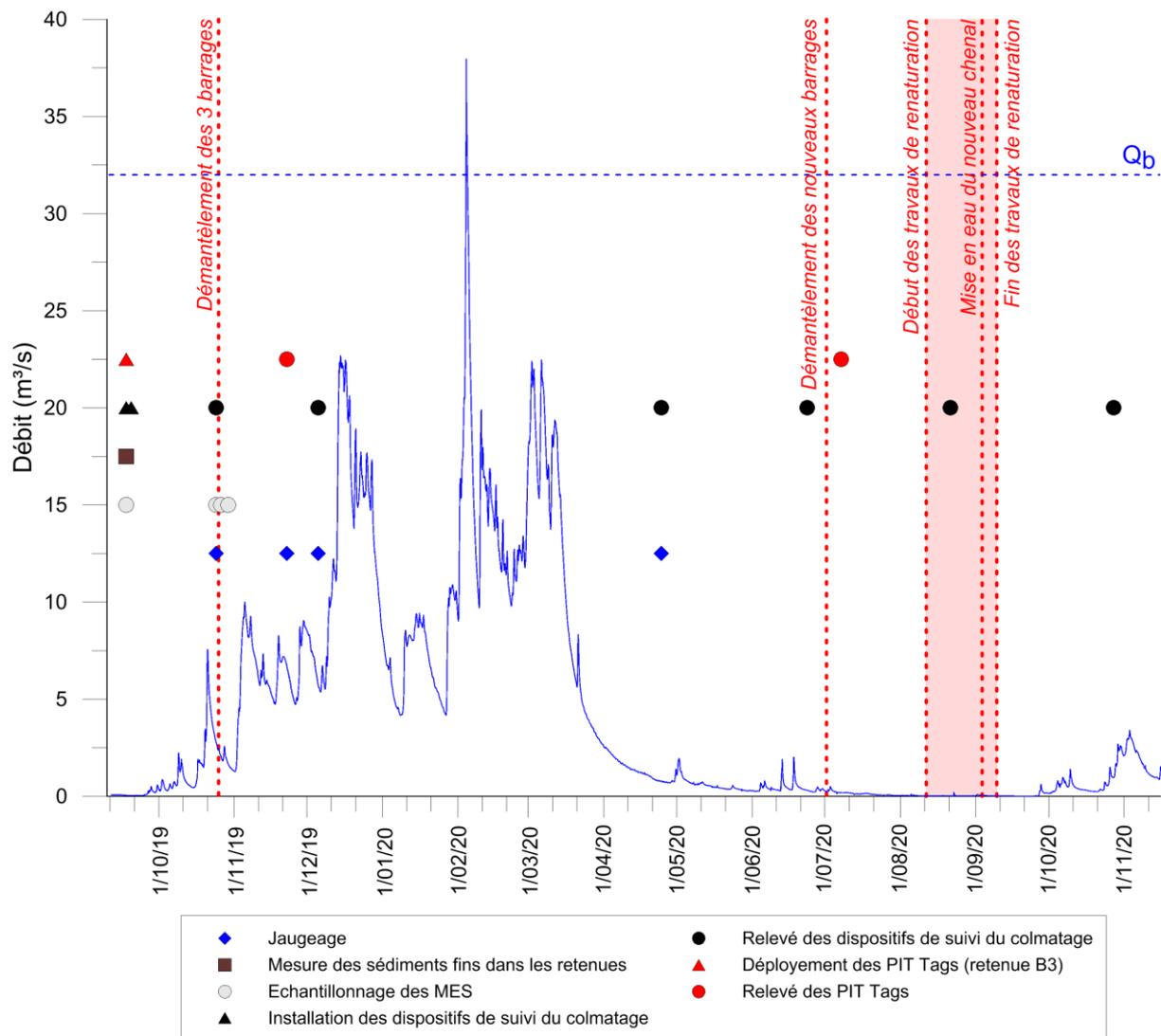
La surface affectée par la présence des sédiments fins est mesurée sur le terrain (mesure du lit mouillé au lasermètre-distancemètre au niveau des profils en travers et mesure de la distance longitudinale au décamètre).

Le calcul du volume de sédiments piégés à l'amont des trois barrages a été effectué dans Excel. L'épaisseur moyenne de sédiments est d'abord calculée pour chaque profil en travers. L'épaisseur moyenne du profil est ensuite multipliée par la largeur du profil et la moitié de la distance longitudinale qui le sépare de ses deux profils voisins. Enfin, le volume total est calculé en additionnant les volumes mesurés au niveau de chaque profil en travers.

Pour la retenue n°3, le secteur impacté possède un tracé plus sinueux dans sa partie amont, ce qui rend difficile le calcul du volume de sédiments piégés par la méthode décrite ci-dessus. Dès lors, nous avons utilisé une autre méthode de calcul utilisant le logiciel ArcGIS (version 10.5.1). Pour ce faire, l'ensemble des mesures d'épaisseur a été cartographié dans un *shapefile*. Ce dernier a ensuite servi de base à une interpolation (méthode "*natural neighbor*") générée sur l'ensemble de la surface affectée par la présence des sédiments fins, fournissant un *raster* dont chaque pixel (maille de 5 cm) possède une valeur d'épaisseur de vase. Le volume de sédiments piégés est ensuite déterminé en multipliant la somme des valeurs de chaque pixel par la surface du pixel.

## **2.2. Hydrogramme et mesure du débit par jaugeage**

Les données de débits utilisées pour réaliser l'hydrogramme de la période d'étude proviennent de la station L5610 du réseau de surveillance hydrométrique Aqualim du Service public de Wallonie (figure 4). Cette station limnimétrique, en activité depuis 1975, est située à Martelange. Le bassin versant de la Sûre y est de 209 km<sup>2</sup>. La crue maximale de la période hivernale 2019-2020 est 38 m<sup>3</sup>/s. La récurrence d'un tel événement, calculée sur base des séries partielles, est de 1,25 an. Durant la période estivale de 2020, la Sûre a connu un étiage extrême. Le débit minimal observé lors de cette période est de 0,001 m<sup>3</sup>/s. Ce débit est le plus faible jamais enregistré par la station limnimétrique de Martelange depuis sa mise en service. Le niveau extrêmement bas de la Sûre s'est maintenu durant approximativement 3 mois, avec une recharge progressive qui a débuté fin septembre 2020. Au niveau du site d'étude de Volaville, cet étiage s'est traduit par un atterrissement partiel de la rivière en aval du site de reméandration.



**Figure 4 Hydrogramme de la période d'étude. Débits exprimés en m<sup>3</sup>/s à la station de Martelange et opérations réalisées**

Étant donné la différence de taille de bassin versant entre la Sûre à Martelange (209 km<sup>2</sup>) et à Volaville (36 km<sup>2</sup>), il était nécessaire d'estimer le débit au plus proche du site pour pouvoir mettre en évidence l'impact hydrologique du démantèlement des barrages de castor. Une station limnigraphique a ainsi été installée directement à l'aval des barrages à démanteler. Quatre jaugeages ont été réalisés afin de calibrer cette station, permettant ainsi de connaître le débit au niveau du site d'étude. Ces jaugeages ont été réalisés à la sonde électromagnétique (Flo-mate 2000 de Marsh-McBirney) environ 25 m en aval du barrage 3 au niveau d'un site propice à la mesure des vitesses (figure 5). Le débit a été déterminé par interpolation du champ de vitesse. Les quatre jaugeages ont permis de construire une courbe de tarage. Une sonde autonome de mesure de pression (TD-Diver<sup>TM</sup> vanEssen Instruments) était installée au niveau de la station limnigraphique durant la période des travaux de démantèlement (figure 6). Le TD-Diver prend une mesure de pression et de température pour un pas de temps programmable et stocke les données dans sa mémoire interne. Les données sont récupérées sur PC grâce à un lecteur USB qui

communiquée avec la sonde via transmission optique. Ces données de pression, après compensation avec les valeurs locales de pression atmosphérique, permettent de connaître la hauteur d'eau. Le Diver a enregistré une mesure toutes les minutes tout au long de la journée du démantèlement.



Figure 5 Opérateur en train de réaliser un jaugeage à la sonde électromagnétique



Figure 6 Échelle limnigraphique installée sur site avec dispositif contenant le TD-Diver™

### 2.3. Mesures de concentrations en MES durant les opérations de démantèlement et estimation du volume de sédiments relâchés

Le taux de sédiments fins transportés en suspension a fait l'objet d'un suivi dans le temps (avant, pendant et après les démantèlements) et dans l'espace (1 site de référence en amont et 8 sites en aval). La méthode utilisée consiste à prélever les échantillons directement dans la rivière à l'aide de bouteilles en polyéthylène d'une contenance de 1500 ml. Les prélèvements sont réalisés juste sous la surface de l'eau au centre du chenal. Dix sites ont été échantillonnés :

- P0 : en amont du barrage 1 (site de référence) ;
- P1 : 20 m en aval du barrage 3 ;
- P2 : 50 m en aval du barrage 3 ;
- P3 : 100 m en aval du barrage 3 ;
- P4 : 200 m en aval du barrage 3 ;
- P5 : 400 m en aval du barrage 3 ;
- P6 : sur la Géronne (50 m en amont de la confluence avec la Sûre) ;
- P7 : 600 m en aval du barrage 3 (en amont de la confluence avec la Géronne) ;
- P8 : 650 m en aval du barrage 3 (50 m en aval de la confluence avec la Géronne) ;
- P9 : 1700 m en aval du barrage 3 (au niveau de la station limnigraphique L8510 du réseau Aqualim à Winville).

L'ensemble des sites a fait l'objet de 106 échantillonnages avant/durant/après les opérations de démantèlement.

Avant démantèlement, deux échantillons ont été prélevés au niveau du site de référence en amont des barrages (P0) et en aval du barrage n°3 (P7) à deux reprises (17/09/2019 et 24/10/2019) afin de fournir des valeurs de référence de concentration en MES.

Les travaux de démantèlement ont été réalisés le 25/10/2019 entre 10h27 et 14h25. Durant et après les démantèlements, un opérateur a parcouru le secteur situé en aval du barrage n°3 en prélevant les 9 échantillons aval à 7 reprises (intervalle d'une heure entre chaque série de prélèvements). En parallèle, le site P1 a fait l'objet de prélèvements réguliers toutes les 15 minutes par un autre opérateur. Des prélèvements complémentaires ont été réalisés sur le site P1 aux moments clés des démantèlements (durant lesquels le relargage des sédiments semblait le plus important). Le monitoring du 25/10/2019 a ainsi été réalisé sur une période de huit heures et demie.

Les échantillons collectés ont ensuite été analysés en laboratoire afin de mesurer la concentration en MES. Pour ce faire, le contenu de chacune des bouteilles est filtré sur un filtre en microfibre de verre (maille 1,2  $\mu\text{m}$ ) préalablement passé à l'étuve à une température de 110°C pendant une heure afin d'éliminer son humidité et pesé à 0,1 mg près (Van Campenhout *et al.*, 2013). Afin d'accélérer la filtration, celle-ci se fait sous vide à l'aide d'une pompe à vide. Le volume d'eau recueilli est mesuré avec une résolution de 1 ml. Le filtre chargé de sédiments est ensuite passé à l'étuve à une température de 110°C pendant quelques heures. Une fois sec puis stabilisé hygrométriquement à température ambiante, il est à nouveau pesé. La quantité de matières en suspension, exprimée en mg/l est déduite de la différence de masse entre le filtre chargé et le filtre brut. La concentration est obtenue grâce au volume de l'échantillon (mg/l).

Les valeurs de concentration en MES des échantillons nous ont permis de calculer le volume de sédiments fins libérés par les démantèlements et de déterminer leur sédimentation sur le secteur aval étudié. Pour déterminer ce volume ( $\text{m}^3$ ), il est nécessaire de connaître le débit liquide ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) et la concentration en MES (mg/l) associée à ce débit. Le débit liquide a été calculé sur base de la courbe de tarage obtenue grâce aux trois jaugeages effectués. Les prélèvements réguliers de MES (toutes les 15 minutes) effectués durant les démantèlements ont ainsi permis de calculer le volume de sédiments fins libérés. Quant aux prélèvements de MES effectués sur les sites plus en aval, ils permettent d'évaluer la décroissance de concentration en MES vers l'aval, en lien avec leur sédimentation sur le fond du lit. Le volume de sédiments libérés par les travaux ( $\text{m}^3$ ) peut ainsi être divisé par la superficie du lit affectée par la sédimentation ( $\text{m}^2$ ) afin de déterminer l'épaisseur des sédiments accumulés (m) susceptibles d'altérer les habitats de moules d'eau douce. De plus, grâce aux prélèvements réalisés sur le secteur aval, nous pouvons déterminer les variations de l'épaisseur de sédimentation entre chaque site d'échantillonnage.

## 2.4. Évaluation du colmatage à court et moyen terme

Afin d'évaluer l'impact des démantèlements sur le colmatage des habitats de moules d'eau douce situés en aval des barrages, deux types de dispositifs de suivi ont été installés sur quatre seuils (radiers), à savoir trois seuils situés à 65 m, 180 m et 290 m en aval du barrage n°3 et un seuil situé en amont de la retenue n°1 (site de référence).

Ces deux dispositifs ont été installés dès le début de la mission (17-19/09/2019) et récupérés juste avant les travaux de démantèlement (24/10/2019) afin de pouvoir caractériser le colmatage en période hors-travaux (période I). Les pièges et sticks hypoxies ont ensuite fait l'objet d'un deuxième relevé (5/12/2019) pour caractériser l'impact des démantèlements (période II). Les dispositifs ont ensuite été à nouveau relevés en avril 2020 (période III), puis tous les deux mois jusqu'en octobre 2020 pour caractériser le colmatage à moyen terme (périodes IV à VI). Il faut toutefois préciser que les dispositifs n'ont pas pu être relevés entre le 5/12/2009 et le 24/04/2020 à cause du niveau d'eau trop élevé (figure 4) d'une part, et des mesures sanitaires liées à la crise du coronavirus d'autre part (autorisation de la reprise des missions de terrain délivrée par l'ULiège le 21/04/2020).

### 2.4.1. STICKS HYPOXIES

Le premier dispositif est la méthode des sticks hypoxies, qui consiste à mettre des bâtonnets de bois non traités en place dans les sédiments du fond du lit pour une durée de minimum 4 semaines (Marmonier *et al.*, 2004). Ces bâtonnets vont se colorer en milieu anoxique par l'action des bactéries anaérobies. La coloration du bois est due au fait qu'en l'absence d'oxygène, les bactéries anaérobies vont oxyder les minéraux dissouts, ce qui les fait précipiter, tachant le bois en gris. En milieu non colmaté riche en oxygène, le bois gardera sa couleur d'origine. En d'autres termes, les sédiments fins qui s'infiltrent dans les interstices de la matrice des sédiments grossiers et limitent les échanges de nutriments et d'oxygène, vont *in fine* conduire à des processus d'anaérobie. Le bâtonnet est en pin (ou en bois blanc plus généralement), d'une longueur d'environ 30 cm, et pour une section carrée d'1 cm de côté. Un trou est percé à environ 1 cm de l'extrémité supérieure du stick afin d'y attacher un fil électrique gainé de plastique coloré, ce qui permet de le localiser. Les sticks sont enfoncés dans la couche sur une profondeur de 30 cm. Lors de sa récupération, la distance entre le sommet du stick (partie affleurant au fond du lit) et la première zone de noircissement est mesurée. Il importe de faire la mesure rapidement sur le terrain car la couleur noire a tendance à s'estomper rapidement lorsque le biofilm sèche (Peeters *et al.*, 2013).

### 2.4.2. PIÈGES À SÉDIMENTS

Le second dispositif consiste en des pièges à sédiments enfouis sous la surface du lit, qui permettent de quantifier l'infiltration de sédiments fins dans la sous-couche (Levecq & Petit, 2008; Mols & Petit, 2007). Le piège a la forme d'un cylindre de

10 cm de diamètre et de 30 cm de longueur. Il est installé horizontalement dans un socle, lui-même enchâssé dans le fond du lit, à une profondeur d'une dizaine de cm. L'ouverture du piège (grillage de maille de 6 mm) présente une surface de 200 cm<sup>2</sup> exposée au flux de décantation. Le piège est muni d'un couvercle amovible afin d'éviter les pertes de fines lors de la récupération du dispositif. Il est rempli de sédiment autochtone de taille supérieure à la maille de la grille. Lors de l'installation du piège, le bord du réceptacle coïncide avec la surface du fond du lit. Le piège collecte ainsi les sédiments de taille inférieure à 6 mm mobilisés par le courant du cours d'eau et qui se déposent sur le fond du lit par décantation. La configuration des pièges bloque les mouvements d'eau de la sous-couche, ainsi les sédiments qui s'y infiltrent ne sont pas remis en circulation par la suite. Seuls les sédiments déposés à la surface peuvent être emportés par le courant d'eau de la rivière. Le contenu des pièges est récupéré après quelques semaines pour être analysé en laboratoire. Étant donné que les sédiments piégés dans la retenue sont de taille inférieure à 500 µm, les échantillons des pièges à sédiments ont été tamisés à cette limite granulométrique (500 µm). Une autre séparation granulométrique a été réalisée à 2000 µm (limite supérieure de la fraction sableuse) et à 6000 µm (maille du treillis utilisé pour la fabrication des pièges). Quatre classes granulométriques sont donc séparées : > 6000 µm, 6000-2000 µm, 2000-500 µm et < 500 µm. Connaissant la masse de sédiments correspondant à ces classes granulométriques, il est possible de déterminer un taux de remplissage des vides. D'une part, la fraction > 6000 µm ayant servi à remplir les pièges est pesée. La masse est ensuite divisée par la densité (2,6) pour connaître le volume des éléments grossiers (> 6000 µm). La part de vide peut donc ensuite être estimée par différence par rapport au volume du cylindre (2623 cm<sup>3</sup>). Le pourcentage de vide se situe entre 41 et 48 % en fonction du taux de remplissage des pièges. Enfin, de la même manière le volume de chaque classe granulométrique < 6000 µm correspondant aux sédiments piégés peut également être estimé et le pourcentage de remplissage des vides par les différentes fractions estimé. Afin de pouvoir comparer les données des différentes campagnes de prélèvement, dont la durée était parfois légèrement supérieure à 1 mois (notamment pour des raisons hydrologiques qui ne permettaient pas le relevé dans de bonnes conditions) les données ont été standardisées sur une période de 30 jours (1 mois).

## **2.5. Effet des démantèlements sur la progression de la vague sédimentaire des galets piégés dans les retenues**

Afin de quantifier l'importance de la vague sédimentaire (galets) consécutive au démantèlement des barrages, 100 galets marqués avec des PIT Tags ont été déployés dans la retenue du barrage n°3 avant les travaux de démantèlement, 5 m en amont du barrage. Les PIT Tags sont des transpondeurs passifs de petite dimension (23 mm de long et 4 mm de diamètre ; figure 7) qui sont introduits dans des galets (Lamarre *et al.*, 2005 ; Houbrechts *et al.*, 2015). Ces puces ne contiennent pas de batterie et doivent être activées par le champ magnétique émis par l'antenne

du récepteur (figure 8). Le PIT Tag contient un code unique qui permet de reconnaître le galet marqué parmi les éléments qui constituent le lit mineur. L'antenne permet de localiser les galets marqués avec une précision de 50 cm. Les galets déployés en amont du barrage 3 ont été prélevés quelques centaines de mètres en amont du site.



Figure 8 Antenne de détection

### 3. RÉSULTATS

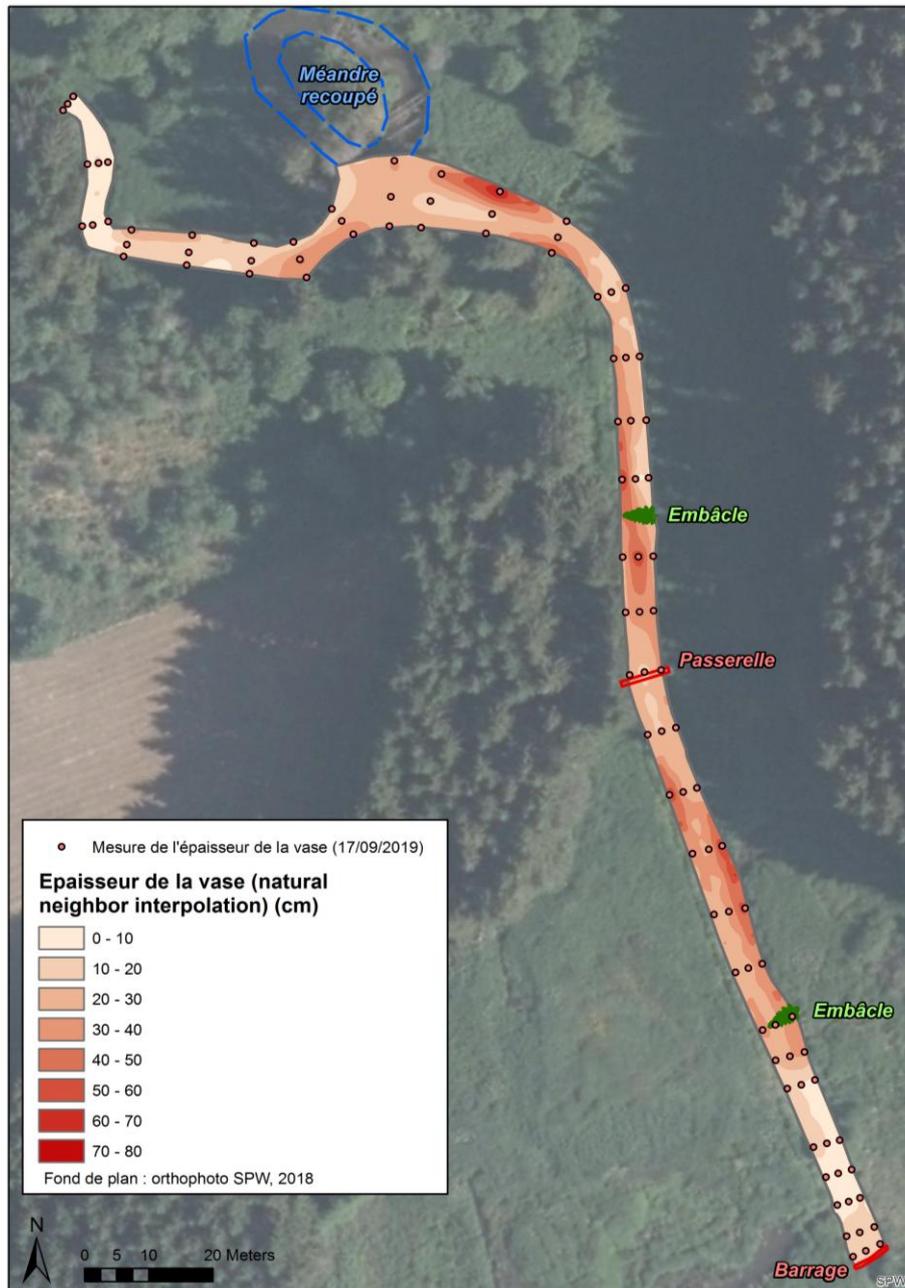
#### 3.1. Quantification des volumes de sédiments fins piégés dans les retenues

Les mesures d'épaisseur de vase ont été réalisées le 17/09/2019 pour des conditions de basses eaux. Le volume calculé des sédiments fins piégés dans les trois retenues est de 616 m<sup>3</sup> (tableau 1). Il apparaît que la retenue du barrage 1 possède le plus grand volume de sédiments piégés (381 m<sup>3</sup>), probablement en raison de sa position amont par rapport aux autres barrages. L'épaisseur de sédiments est plus importante à proximité des embâcles et au niveau de la confluence avec le bras mort du méandre recoupé, où le lit présente une surlargeur (figure 9). Le barrage 2, situé sur l'ancien drain par lequel s'écoule la majeure partie du débit de la Sûre, possède, quant à lui, 138 m<sup>3</sup> de sédiments piégés. Enfin, le barrage 3 comporte moins de sédiments fins (97 m<sup>3</sup>) probablement en raison des moindres apports en MES du à sa position (en aval des barrages 1 et 2). De plus, une partie conséquente du tronçon où se situe la retenue du barrage 3 est périodiquement à sec, diminuant encore l'apport en MES. En effet, seule la partie aval du tronçon (c'est-à-dire depuis la confluence avec l'ancien drain) est continuellement en eau.

**Tableau 1 : Volume de sédiments fins piégés dans les trois retenues (relevés du 17/09/2019)**

|             | Nombre de mesures | Linéaire du secteur impacté (m) | Volume de sédiments fins piégés (m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-------------------|---------------------------------|---|
| Barrage n°1 | 96                | 270                             | 381   |
| Barrage n°2 | 31                | 84                              | 138   |
| Barrage n°3 | 28                | 62                              | 97  |

L'épaisseur des sédiments fins piégés dans la retenue du barrage 3 varie entre 0 et 79 cm (moyenne de 25 cm).



**Figure 9 Répartition des sédiments fins piégés dans la retenue du barrage n°1 (relevés du 17/09/2019)**

### 3.2. Hydrogramme et mesure du débit

Les jaugeages ont permis de calculer une courbe de tarage (figure 10) qui elle-même permet de connaître le débit pour une hauteur d'eau donnée. La meilleure relation pour la courbe de tarage avec les quatre points obtenus est une relation de puissance (Roche, 1963). Les hauteurs d'eau au début des travaux de démantèlement des barrages et à la fin des travaux étaient respectivement de 33,5 cm et 36 cm. Durant les opérations de démantèlement, la hauteur d'eau maximale enregistrée est de 48 cm et se situe ainsi dans l'intervalle des valeurs de hauteur d'eau pour lesquelles des jaugeages ont été réalisés. Les conversions de hauteurs en débits ne se basent donc pas sur des extrapolations.

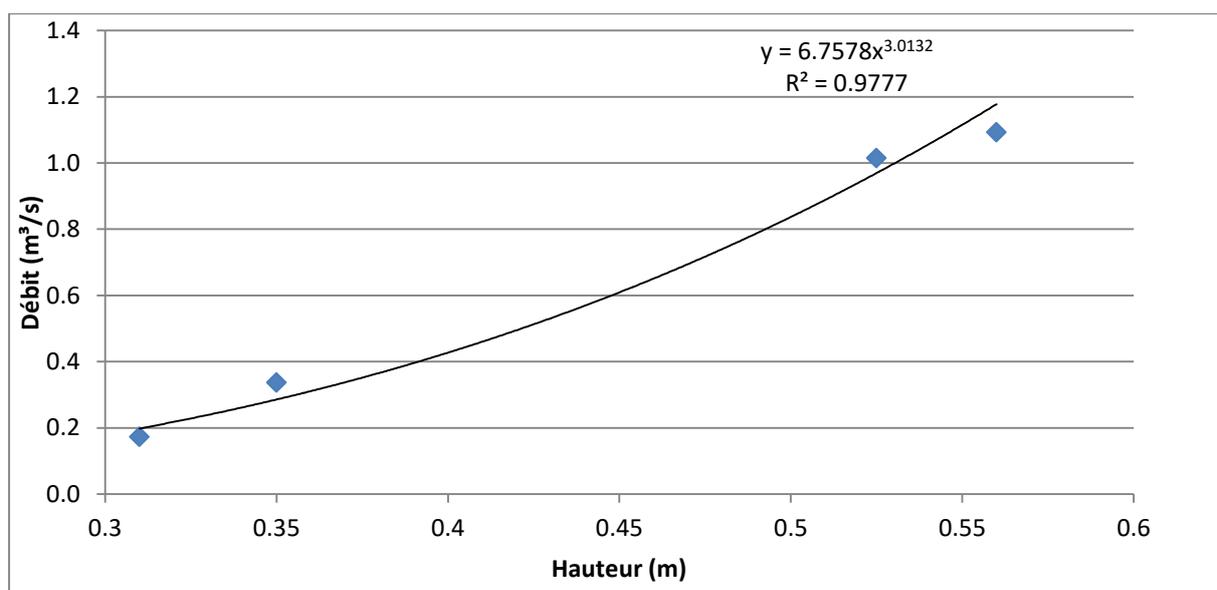


Figure 10 Courbe de tarage (Volaiville) avec équation

Le tableau 2 présente les hauteurs d'eau relevées à la station limnigraphique installée en aval des barrages à démanteler, les valeurs de débit mesurées *in situ* par jaugeages, et les hauteurs d'eau enregistrées à la station limnigraphique de Winville du réseau Aqualim. Cette station, mise en service le 20/07/2019 (et donc non encore calibrée lors des travaux de démantèlement), correspond au dernier point d'échantillonnage des MES (P9). Le bassin versant de la Sûre y est de 84 km².

Tableau 2 Dates des jaugeages, hauteurs d'eau observées, débits mesurés et hauteurs d'eau à la station limnigraphique de Winville (L8510)

|                                    | Hauteur eau à l'échelle limnigraphique | Q (m³/s) | Hauteur d'eau à la station de Winville |
|------------------------------------|--|----------|--|
| 24/10/2019 à 13h30 (+ PA 25/10/19) | 0,35                                   | 0,337    | 0,40                                   |
| 22/11/2019 à 10h00                 | 0,56                                   | 1,093    | 0,62                                   |
| 5/12/2019 à 10h00                  | 0,53                                   | 1,015    | 0,60                                   |
| 24/04/2020 à 9h45                  | 0,31                                   | 0,173    | 0,29                                   |

L'hydrogramme des débits durant les travaux (25/10/2019) est présenté sur la figure 11 en même temps que les résultats de concentrations en MES.

### 3.3. Évolution des concentrations en MES en aval des barrages durant les opérations de démantèlement et estimation du volume libéré

#### AVANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

En situation naturelle, la quantité de MES dans la rivière est essentiellement due à l'érosion des berges et du lit, et aux ruissellements sur le bassin versant. Des apports anthropiques peuvent également affecter cette concentration. Bien que le ruissellement soit important dans le bassin de la Sûre (nature imperméable de la roche mère), les MES restent faibles même durant les crues ; la présence prépondérante de prairies permanentes dédiées à l'élevage bovin et des forêts limitant l'érosion des terres.

La valeur témoin de la charge en MES en amont des barrages de Volaille est de l'ordre 10-14 mg/l (17/09 et 24/10 ; tableau 3), ce qui correspond à la charge normale de la Sûre dans la masse d'eau ML08R. En effet, le taux de MES moyen mesuré entre 2009 et 2016 par le SPW (base de données AQUAPHYC) pour des conditions de débits similaires est de 15 mg/l (médiane de 10 mg/l).

Les concentrations en MES en aval des barrages (de l'ordre de 4-6 mg/l) sont systématiquement inférieures à celles mesurées en amont, ce qui pourrait s'expliquer par la sédimentation d'une partie des MES dans les trois retenues (tableau 3). Il faut toutefois rester prudent car ces différences pourraient également s'expliquer en partie par la précision de la méthode (de l'ordre de 2 mg/l).

**Tableau 3 : Concentration en MES de la Sûre à Volaille avant et après travaux**  
(les débits sont calculés sur base de quatre jaugeages et des hauteurs d'eau (cf. § 2.2.))

|            | MES en amont des barrages (mg/l) | MES en aval des barrages (mg/l) | Débit (m <sup>3</sup> /s) |
|------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 17/09/2019 | 11,44                            | 4,40                            | 0,039                     |
| 24/10/2019 | 13,64                            | 5,66                            | 0,286                     |
| 25/10/2019 | 10,14                            | 6,5                             | 0,250                     |

#### PENDANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT : À L'AVAL DIRECT DU BARRAGE 3 (P1)

Les trois barrages ont été démantelés successivement le 25/10/2019 entre 10h30 et 14h30 dans des conditions de basses eaux. Le débit journalier enregistré à Martelange pour la journée du démantèlement correspond en effet à 2/3 du module, soit 0,076Q<sub>b</sub>. Premièrement, le barrage 3 a été démantelé en cinq étapes sur une

période de 60 minutes. Pour rappel, la retenue du barrage 3 comportait le moins de sédiments fins piégés (97 m<sup>3</sup>). Deuxièmement, le barrage 2 a été rapidement détruit en deux étapes (10 min). La destruction du barrage 2 a nécessité le passage de la machine dans le cours principal de la Sûre sur un gué aménagé avec des branchages. Ce deuxième barrage contenait une quantité intermédiaire de sédiments piégés (138 m<sup>3</sup>). Finalement, le barrage le plus en amont (et contenant le plus de sédiments, 381 m<sup>3</sup>) a été démonté en deux étapes échelonnées sur 20 minutes. Après démontage, du substrat a été prélevé dans le lit de la rivière (raclage) au niveau de barrage 1 pour colmater la tranchée creusée en rive gauche par laquelle s'écoulait la majeure partie du débit. Les travaux ont pris fin à 14h30.

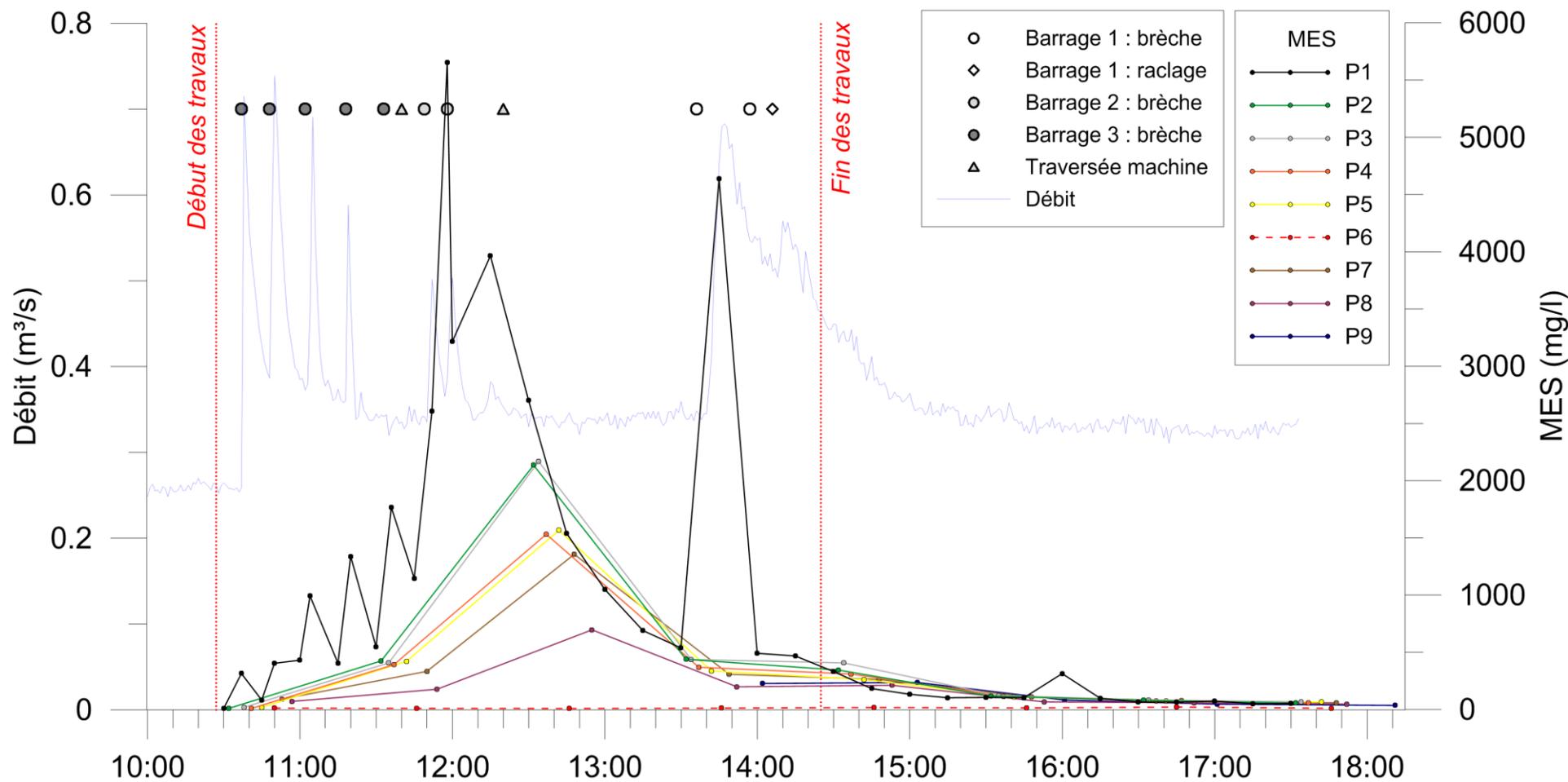


Figure 11 Évolution du débit et des concentrations en MES durant et après les travaux de démantèlement des trois barrages de castor (25/10/2019)

Un maximum de précautions a été pris pour la destruction des barrages, et *a fortiori* pour le premier à être enlevé (barrage 3). Les branches et autres matériaux le constituant ont été retirés en cinq étapes successives qui peuvent s'observer avec les quatre hausses de débit entre 10h30 et 11h20 (figure 11). La dernière étape (5<sup>ème</sup>) consistait à enlever les branchages résiduels suite aux 4 premières brèches, c'est pourquoi elle n'a pas été suivie d'une hausse de la hauteur d'eau. Une concentration > 300 mg/l de MES a été mesurée suite à l'enlèvement de la partie supérieure du barrage 3 (étape 1). Cette première brèche était destinée à baisser le niveau d'eau pour éviter une vague trop importante en aval. Le relargage de matières fines suite à cette première brèche a été bref et instantané, après seulement 8 minutes le taux de MES était déjà quatre fois moins important. Les brèches suivantes ont entraîné des réactions similaires, avec une hausse quasi instantanée des MES lors du passage du « nuage » provoqué par une brèche dans le barrage, rapidement suivie d'une décroissance de la concentration en MES.

La destruction du barrage 2, situé sur le bras de contournement, a entraîné la plus forte concentration en MES mesurée pendant les travaux de démantèlement (jusqu'à 5,6 g/l). La quantité de MES relâchée du barrage 2 était fort importante, et le relargage s'est poursuivi pendant un laps de temps relativement long (> 40 min). Bien qu'ayant fortement diminué, le taux de MES était toujours important (> 500 mg/l) au moment du début de la destruction du barrage 1.

Le démantèlement du barrage 1 a généré un pic moins important de MES mesurées. La concentration maximale atteinte est de 4,6 g/l. Seulement 15 minutes après la première brèche, le taux de MES est déjà repassé en-dessous des 500 mg/l. Par la suite, la concentration en MES a diminué graduellement jusqu'à la fin des prélèvements (17h30). Il est possible qu'une partie des sédiments déstockés de la retenue du barrage 1 ait sédimenté sur le tronçon entre ce barrage et le point d'échantillonnage P1.

Notons qu'une valeur de 300 mg/l a été mesurée à 16h, alors que les travaux étaient terminés. Cela pourrait s'expliquer par un relargage local de sédiments fins consécutif à une réorganisation du lit dans les anciennes retenues (branche qui s'est débloquée, amas instable de vase...).

En comparant les effets des démantèlements des trois barrages, il apparaît que la retenue du barrage 2 a relargué davantage de sédiments fins que les deux autres retenues. Cette différence peut s'expliquer par l'analyse des quantités de sédiments situées dans les cinq premiers mètres amont des trois retenues, c'est-à-dire les sédiments susceptibles d'être relargués vers l'aval dans un premier temps. Il apparaît ainsi que les épaisseurs mesurées au droit du barrage 2 étaient de l'ordre de 50 cm alors qu'elles étaient de l'ordre de 15-20 cm pour les barrages 1 et 3.

#### **PENDANT LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT : SUR L'ENSEMBLE DU SECTEUR AVAL ÉTUDIÉ**

Parallèlement à l'échantillonnage directement en aval de l'emplacement du barrage 3 (site P1), des prélèvements ont été réalisés au niveau de sept sites distribués de plus en plus en aval le long de la Sûre (P2, P3, P4, P5, P7, P8, P9), ainsi que sur la

Géronne (P6). Les résultats indiquent une hausse des MES jusqu'à plus de 1,7 km en aval de P1. Assez logiquement, toutes les courbes obtenues avec les valeurs de MES de ces échantillonnages suivent la même tendance, augmentant et diminuant concurremment. De manière générale, plus le point d'échantillonnage est situé en aval, moins la concentration en MES est importante. Cette décroissance du taux de MES est due à la sédimentation qui s'opère et, pour P8 et P9, à la dilution liée aux affluents. Notons qu'il peut paraître surprenant que la valeur de concentration de P9 soit ponctuellement supérieure à celle de P8. Il faut toutefois rappeler que la distance entre ces deux sites est d'environ 1 km et que maximum 10 minutes séparent la prise des deux échantillons, ce qui augmente la probabilité d'échantillonnage de pics de concentration différents.

#### APRÈS LES TRAVAUX DE DÉMANTÈLEMENT

La teneur en MES était presque revenue à la normale le lendemain (tableau 4), et était parfaitement dans la norme quatre jours plus tard (tableau 4). Les valeurs de MES relevées en aval des barrages (lorsqu'ils étaient toujours en place) étaient strictement inférieures à 10 mg/l (cf. tableau 3). Après démantèlement, ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que les valeurs témoins en amont des barrages ce qui indique qu'il n'y a plus de remaniement des sédiments qui étaient piégés dans les retenues pour ces conditions de vitesse de courant. Ces sédiments ont pu être remaniés par des crues plus importantes par la suite, mais il est probable que les vitesses auront alors été suffisantes pour empêcher une sédimentation de fines sur le lit.

**Tableau 4 : Concentration en MES des échantillons témoins prélevés après les travaux (les débits sont calculés sur base de la courbe de tarage établie ci-dessus (cf. § 2.2.))**

| Date       | MES en aval des barrages (mg/l) | Débit (m <sup>3</sup> /s) |
|------------|---------------------------------|---------------------------|
| 26/10/2019 | 18,43                           | 0,311                     |
| 29/10/2019 | 11,29                           | 0,286                     |

#### BILAN DU VOLUME DE SÉDIMENTS RELARGUÉS

Le volume de sédiments libérés a pu être calculé à partir des mesures de concentration en MES au site P1. Pour ce faire, il a été nécessaire d'obtenir d'abord une valeur de débit liquide et une valeur de concentration en MES pour chaque minute de la période considérée (entre 10h30 et 17h30), ce qui permet par la suite de calculer la masse de sédiments transportés pour chaque minute (débit (l/s) x concentration en MES (mg/l) x 60 secondes). L'addition de l'ensemble des valeurs obtenues fournit ensuite la masse de sédiments transportés sur la période étudiée. Cette masse est convertie en volume, tenant compte de la densité des sédiments (1,6 t/m<sup>3</sup>, soit la densité du sédiment avec une porosité de 40%).

Le volume obtenu pour le site P1 est de 5,67 m<sup>3</sup>. Son calcul repose sur la détermination de la concentration en MES de 36 d'échantillons (toutes les 15 minutes

et aux moments clés des démantèlements). Afin d'attribuer une valeur de MES aux minutes comprises entre deux échantillonnages, nous avons réalisé une interpolation linéaire des valeurs, sauf lorsqu'une action des travaux ne le justifiait pas (par exemple, pour une forte augmentation suite à une brèche dans le barrage). Notons aussi que, pour les travaux effectués sur le barrage 1, nous avons tenu compte du temps de progression du pic de concentration (4 minutes, mesurées à l'aide d'un flotteur).

Grâce aux prélèvements réalisés toutes les heures sur le secteur aval, nous pouvons évaluer un volume de sédiments transportés en suspension durant la période d'étude, et ce pour chaque site. Il faut toutefois préciser que les périodes d'étude sont légèrement différentes selon les sites, bien que leur durée soit identique (7h), cela n'affecte donc pas leur comparaison. Il est également nécessaire d'effectuer la comparaison sur base d'une densité d'échantillonnage identique (1 valeur toutes les heures). C'est pourquoi le site P1 a été réévalué moins finement que pour la méthode exposée ci-dessus, ce qui a fourni un volume de 3,61 m<sup>3</sup> (sur base de 8 valeurs).

La comparaison du volume libéré (P1) avec le volume transporté en P2 indique que 0,62 m<sup>3</sup> de sédiments se sont déposés sur le secteur de 30 m compris entre ces deux sites d'échantillonnage (tableau 5). Compte tenu de la superficie du secteur, l'épaisseur moyenne de sédiments déposés sur ce secteur est de 3,7 mm.

La comparaison des volumes entre P2 et P3 fournit un bilan proche de 0 m<sup>3</sup>, la différence de 0,06 m<sup>3</sup> entre les deux sites n'étant pas significative compte tenu de la précision des estimations de volumes. La suite des comparaisons de volumes montre que le secteur compris entre P3 et P4 présente une sédimentation moyenne de l'ordre de 1,6 mm, alors que les secteurs situés entre P4 et P7 possèdent un bilan proche de zéro.

Finalement, il apparaît de manière plus générale que le secteur situé entre les barrages démantelés et la confluence avec la Gironne (580 m de linéaire) a connu une faible sédimentation (1,53 m<sup>3</sup>) et qu'une grosse partie des sédiments relargués (58 %) a été transportée au-delà de la confluence avec la Gironne. La comparaison des concentrations en MES (cf. § ci-dessus) indique également que la sédimentation a du être relativement faible sur le secteur compris entre la confluence avec la Gironne (P8) et la station limnimétrique (P9), et ce malgré la dilution par la Gironne. Toutefois, ce volume n'a pas été quantifié en raison du plus faible nombre d'échantillons en P9 (5 échantillons prélevés à partir de 14h02).

**Tableau 5 Volumes de sédiments relargués**

| Site | Localisation  | Début suivi | Fin suivi | Volume de sédiments transportés (m³) | Volume de sédiments déposés (m³) | Longueur secteur (m) | Largeur moy. entre pieds de berge (m) | Surface secteur (m²) | Épaisseur moyenne sédimentée (mm) |
|------|---|-------------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| P1   | Sûre : 20 m en aval du barrage n°3  | 10h30       | 17h30     | 3.61                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
|      |   |             |           |                                      | 0.62                             | 30                   | 5.63                                  | 168.75               | 3.67                              |
| P2   | Sûre : 50 m en aval du barrage n°3  | 10h32       | 17h32     | 2.99                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
|      |   |             |           |                                      | -0.06                            | 50                   | 4.20                                  | 210.10               | -0.29                             |
| P3   | Sûre : 100 m en aval du barrage n°3   | 10h38       | 17h38     | 3.05                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
|      |   |             |           |                                      | 0.69                             | 100                  | 4.22                                  | 422.28               | 1.63                              |
| P4   | Sûre : 200 m en aval du barrage n°3   | 10h41       | 17h41     | 2.36                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
|      |   |             |           |                                      | 0.03                             | 200                  | 3.62                                  | 723.20               | 0.04                              |
| P5   | Sûre : 400 m en aval du barrage n°3   | 10h45       | 17h45     | 2.33                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
|      |   |             |           |                                      | 0.25                             | 200                  | 4.8                                   | 960.00               | 0.26                              |
| P7   | Sûre : 600 m en aval du barrage n°3 (amont de la confluence avec la Gironne)        | 10h53       | 17h53     | 2.08                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
| P6   | Gironne : 50 m en amont de la confluence avec la Sûre                               | 10h50       | 17h50     | 0.06                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |
| P8   | Sûre : 650 m en aval du barrage n°3 (50 m en aval de la confluence avec la Gironne) | 10h57       | 17h57     | 2.15                                 |                                  |                      |                                       |                      |                                   |

### 3.4. Évaluation du colmatage à court terme et moyen terme

Le suivi du colmatage à court terme concerne deux périodes (phase 1) :

- la période I, comprise entre le 17-19/09/2019 et le 24/10/2019 (35-37 jours), qui correspond à la situation de référence (avant travaux de démantèlement) ;
- la période II, comprise entre le 24/10/2019 et le 5/12/2019 (42 jours), qui inclut les travaux de démantèlement.

Le suivi du colmatage à moyen terme concerne les périodes III à VI et s'étend sur presque 11 mois (phase 2) :

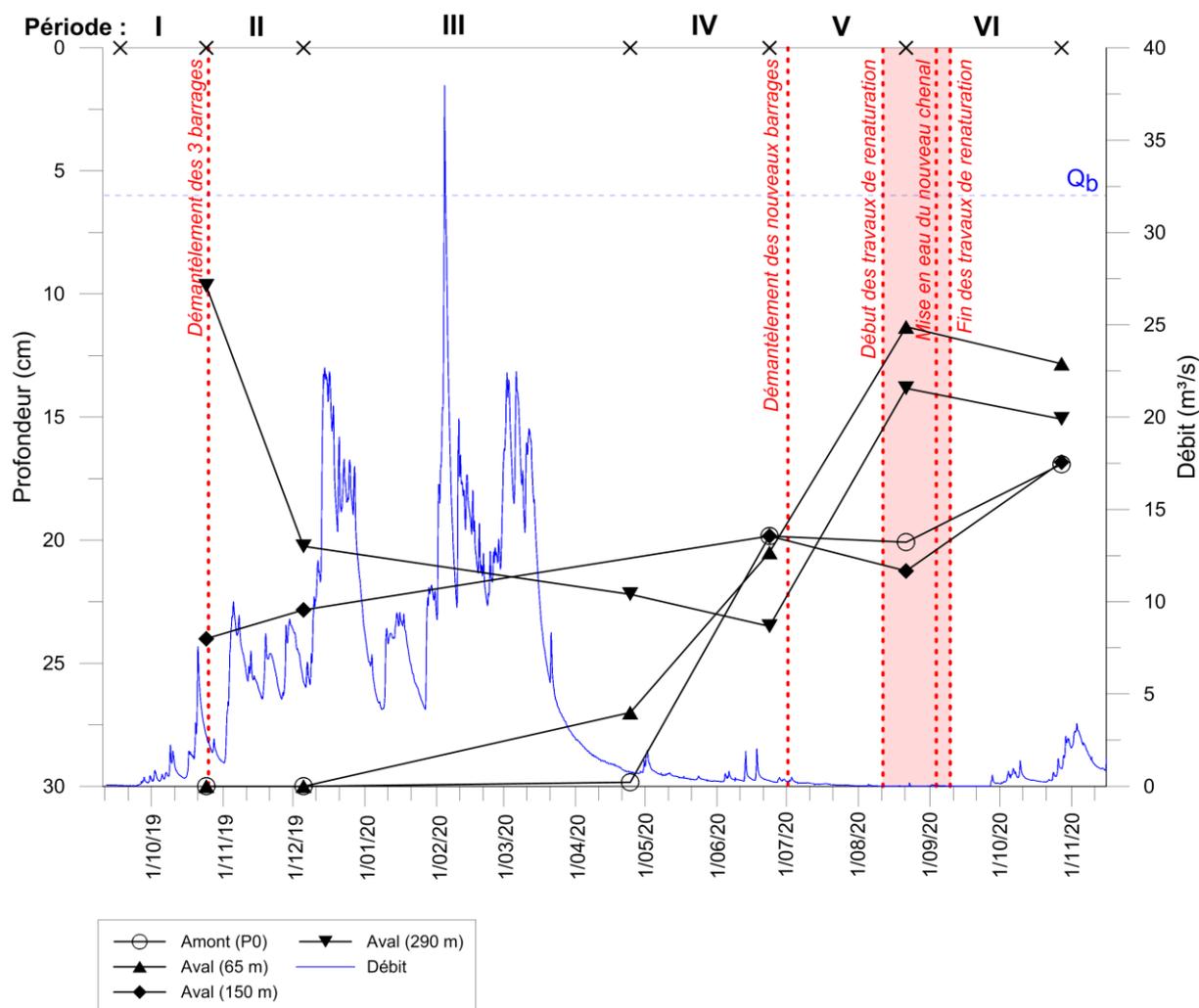
- la période III comprise entre le 5/12/2019 et le 24/04/2020 ;
- la période IV comprise entre le 24/04/2020 et le 23/06/2020 ;
- la période V comprise entre le 23/06/2020 et le 21/08/2020 ;
- la période VI comprise entre 21/08/2020 et le 27/10/2020.

Durant la phase 2, plusieurs évènements perturbant le suivi des dispositifs se sont produits. Premièrement, les débits hivernaux importants, puis la crise sanitaire COVID-19, n'ont pas permis d'effectuer les relevés avant le 24/04/2020. Ainsi, les pièges à sédiments et les sticks hypoxies sont restés en place durant 142 jours (période III). Par la suite, trois relevés ont été effectués, avec environ deux mois entre chaque relevé. Lors de ces périodes (IV à VI), la Sûre a connu un étiage sévère, avec une partie de son lit à sec pendant plusieurs semaines. Ainsi, les dispositifs de suivis sédimentaires lors de ces trois périodes ont été fortement perturbés (*cf. infra*). Dès lors, les résultats présentés ci-après sont à prendre avec précautions concernant les périodes III à VI.

#### STICKS HYPOXIES

De manière générale, le colmatage augmente vers l'aval et dans le temps (figure 12 et tableau 6). Les sticks ne montrent pas de changement significatif entre la situation avant travaux (période I) et après travaux de démantèlement (période II). Il semble

également que le colmatage dans la Sûre se produise par infiltration des sédiments fins en profondeur d'abord, puis par accumulation du bas vers le haut. Ce phénomène dépend de la composition granulométrique du lit et de l'armurage de la surface.



**Figure 12 Évolution de l'épaisseur de la couche de cailloutis non colmatée (mesurée depuis la surface des sédiments)**

Lors de la première période, les sticks démontrent un colmatage des sédiments du lit plus faible que lors des périodes suivantes, à l'exception du site aval 290 m. Une explication possible du colmatage plus important détecté au niveau du site 290 m est la présence entre les sites aval 150 m et 290 m d'un accès à la rivière par le bétail. Lors de la seconde période (post-travaux), les deux sites les plus en aval restent les plus colmatés, alors que le lit au site de référence amont et au premier site aval (65 m) n'est pas colmaté. À la fin de la période III (la plus longue), les niveaux de colmatage restent dans la même logique : peu ou pas colmaté en amont et légèrement plus colmaté vers l'aval. Le débit maximal de cette période est de  $1,2Q_b$  ( $38 \text{ m}^3/\text{s}$  à Martelage le 04/02/2020). Ce débit entraîne relativement peu de charriage et donc peu de décolmatage. Il est donc logique que les niveaux de colmatage soient similaires entre les deux relevés. À noter qu'au relevé précédant

l'hiver, il n'a pas été possible de rééquiper le site aval 150 m avec des sticks hypoxies en raison des conditions hydrologiques peu favorables ; aucune donnée n'est donc disponible pour ce site lors de la période III. Par la suite, probablement avec la diminution des débits (étiage prononcé de l'été 2020), les niveaux de colmatage des sédiments du lit ont augmenté. Les faibles vitesses de courant et l'assec d'une grande partie du lit de la Sûre en aval ont entraîné une sédimentation plus importante en surface. Ceci, couplé à la réduction des mouvements d'eau sous la surface du lit, a conduit à l'anoxie des sédiments et donc au colmatage mis en évidence par les sticks.

**Tableau 6 Épaisseur moyenne non colmatée depuis la surface en cm mesurée avec les sticks hypoxies**

|              | Période | Moyenne | n       | Écart-type |
|--------------|---------|---------|---------|------------|
| Amont (P0)   | I       | 30,0    | 6       | 0,0        |
| Amont (P0)   | II      | 30,0    | 6       | 0,0        |
| Amont (P0)   | III     | 29,8    | 6       | 0,4        |
| Amont (P0)   | IV      | 19,8    | 6       | 8,9        |
| Amont (P0)   | V       | 20,1    | 6       | 11,6       |
| Amont (P0)   | VI      | 16,9    | 6       | 9,9        |
| Aval (65 m)  | I       | 30,0    | 5       | 0,0        |
| Aval (65 m)  | II      | 30,0    | 6       | 0,0        |
| Aval (65 m)  | III     | 27,0    | 5       | 4,2        |
| Aval (65 m)  | IV      | 20,5    | 6       | 8,0        |
| Aval (65 m)  | V       | 11,3    | 6       | 7,3        |
| Aval (65 m)  | VI      | 12,8    | 6       | 4,2        |
| Aval (150 m) | I       | 24,0    | 6       | 7,5        |
| Aval (150 m) | II      | 22,8    | 6       | 8,0        |
| Aval (150 m) | III     |         | No data |            |
| Aval (150 m) | IV      | 19,8    | 6       | 8,9        |
| Aval (150 m) | V       | 21,3    | 6       | 7,0        |
| Aval (150 m) | VI      | 16,8    | 6       | 10,5       |
| Aval (290 m) | I       | 9,7     | 6       | 5,0        |
| Aval (290 m) | II      | 20,3    | 6       | 8,1        |
| Aval (290 m) | III     | 22,2    | 5       | 8,7        |
| Aval (290 m) | IV      | 23,5    | 6       | 8,7        |
| Aval (290 m) | V       | 13,8    | 6       | 9,2        |
| Aval (290 m) | VI      | 15,1    | 6       | 2,2        |

### PIÈGES À SÉDIMENTS FINS

Le tableau 7 compare les résultats de la période I (avant démantèlement) et de la période II (après démantèlement). Ce tableau présente les valeurs de pourcentages de sédiments < 2000 µm et < 500 µm infiltrés en 30 jours dans les pièges (% de vide rempli par mois), et l'épaisseur de sédimentation (également pour la fraction < 2000 µm et < 500 µm) exprimée en mm par mois sur la surface du lit.

Comme le montrent les données du piège de référence situé à l'amont du secteur, une augmentation de la sédimentation de 25 % s'est produite durant la période II par rapport à la période I. Cette augmentation s'explique principalement par un transport

sédimentaire plus important durant la seconde période en lien avec les niveaux d'eau plus importants (cf. figure 13). L'augmentation de la sédimentation en aval du site d'intervention est plus importante (+91 à + 181 %). Cette augmentation, nettement supérieure à la valeur de 25 % observée en amont, ne peut s'expliquer que par les apports sédimentaires en lien avec le démantèlement des barrages.

**Tableau 7 Quantité de sédiments fins infiltrés dans le substrat mise en évidence par les pièges**

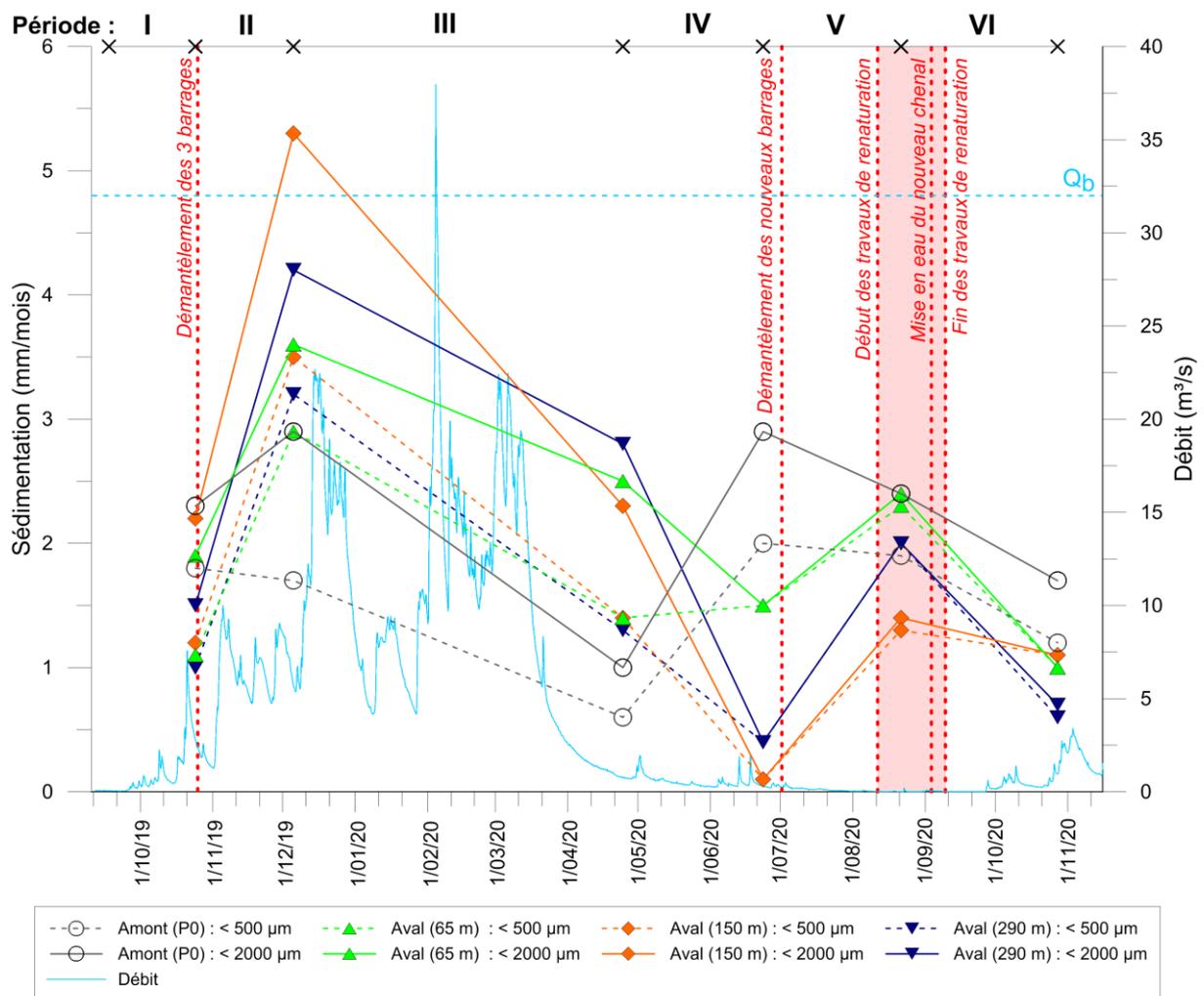
|                  |  | Période I (17-19/09/2019 - 24/10/2019)<br>35-37 jours |                          |                    |                          | Période II (24/10/2019 - 05/12/2019)<br>42 jours |                          |                                   |                    |                          |                                   |
|------------------|--|---|--------------------------|--------------------|--------------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|
|                  |  | <2000 µm  |                          | <500 µm            |                          | <2000 µm   |                          |                                   | <500 µm            |                          |                                   |
|                  |  | % vide rempli/mois                                    | sédimentation /mois (mm) | % vide rempli/mois | sédimentation /mois (mm) | % vide rempli/mois                               | sédimentation /mois (mm) | variation de la sédimentation (%) | % vide rempli/mois | sédimentation /mois (mm) | variation de la sédimentation (%) |
| <b>Amont P0</b>  |  | 3,8   | 2,3                      | 3                  | 1,8                      | 5,3  | 2,9                      | +25                               | 3,1                | 1,7                      | -6                                |
| <b>Aval 65m</b>  |  | 3   | 1,9                      | 1,7                | 1,1                      | 6,1  | 3,6                      | +91                               | 4,9                | 2,9                      | +169                              |
| <b>Aval 150m</b> |  | 3,7   | 2,2                      | 2,2                | 1,2                      | 9,1  | 5,3                      | +146                              | 6                  | 3,5                      | +180                              |
| <b>Aval 290m</b> |  | 2,4   | 1,5                      | 1,7                | 1                        | 7,8  | 4,2                      | +181                              | 6,1                | 3,2                      | +216                              |

Il est intéressant de mettre en relation la sédimentation calculée à partir de la quantité de sédiments relâchée suite au démantèlement avec celle calculée à partir des pièges. Pour rappel (cf. §3.3 ; tableau 5), nous avons estimé que 3,7 mm de sédiments se sont déposés suite au démantèlement sur le lit en amont direct du piège aval 65 m. Au niveau de ce piège, et au terme de la période II, la sédimentation estimée est de 2,9 mm sur 30 jours. Ceci est cohérent, en tenant compte de la variabilité spatiale de la sédimentation, et du remaniement des sédiments les jours suivants. En ce qui concerne les points de prélèvements plus éloignés, l'estimation d'après les MES donne des valeurs faibles, voire nulles, alors que les pièges fournissent des valeurs de l'ordre 3,2 à 3,5 mm. Il est probable que cette différence vient des vitesses de courant suffisantes pendant le démantèlement pour empêcher la sédimentation, ainsi que par le relargage des sédiments dans les jours suivant le démantèlement (fin des travaux et remaniement des sédiments qui étaient piégés dans les retenues).

Les pièges à sédiments des sites aval (65 m, 150 m, 290 m) ont été perturbés lors de la période IV par une cause indéterminée. Ils ont en effet été trouvés dans différentes configurations ; tourné dans leur socle (65 m), à moitié sorti du socle (290 m), et complètement hors de son socle (150 m, retrouvé 2 m en aval). Leur contenu a tout de même été analysé. L'impact des perturbations est bien visible, surtout pour ceux sortis de leur socle. Les valeurs ont été ici fournies à titre

d'information et ne doivent pas être prises en compte par rapport à l'estimation du transport sédimentaire pour cette période. Les pièges aval 65 m, 150 m et 290 m ont également été perturbés lors des périodes V et VI par les débits extrêmement bas qu'a connu la Sûre durant l'été 2020. Les pièges aval se sont trouvés exondés pendant un certain laps de temps durant ces deux périodes. A notre connaissance, le piège amont (P0) n'a pas été exondé durant ces périodes, et n'a pas subi de perturbations anthropiques.

La sédimentation la plus importante mesurée sur toute la durée du suivi du colmatage (phase 1 et 2) est observée suite au démantèlement des barrages (figure 13). La période III, caractérisée par des événements hydrologiques plus importants, présente des taux de sédimentation inférieurs à ceux mesurés dans la période après démantèlement. À l'exception du piège amont, les taux de sédimentation sont similaires entre la période avant travaux de démantèlement et la période III. Les taux anormalement bas observés pour la période IV sont dus aux perturbations subies par les pièges. Les taux de sédimentation de la période V sont également proches des valeurs des périodes I et III, et ce malgré le faible débit.



**Figure 13 Taux de sédimentation calculés à l'aide des pièges à sédiments (en mm/mois) pour les sédiments < 2000 µm et < 500 µm pour les 6 périodes.**

Par ailleurs, il est intéressant de comparer le colmatage des pièges pour des conditions de débits différents. Ainsi, nous avons sélectionné deux échantillons représentatifs situés au niveau du site aval 65 m (figure 14). Le premier correspond aux sédiments piégés de la période III qui intègre un épisode de crue supérieur au débit à pleins bords. Le second correspond à la période V, c'est-à-dire durant la période d'étiage sévère. D'une part, les quantités piégées sont différentes, respectivement 5,9 g/jour et 4,4 g/jour, mais c'est surtout en termes de granulométrie que nous pouvons observer des différences. Ainsi sur la figure 14, il apparaît clairement que les sédiments qui ont été piégés durant la période de crue (III) sont plus grossiers que ceux de la période d'étiage (V). La fraction supérieure à 500 µm correspond à 57,7 % du poids total pour la période III contre 7,8 % seulement pour la période V. Cette différence s'observe également sur la figure 13, où à partir de la période V (étiage), le taux de sédimentation de la fraction < 500 µm est identique ou presque à celui de la fraction < 2000 µm. Pour ce dernier échantillon, la présence de quelques grains dans la classe 5600-6700 µm pourrait s'expliquer par des déplacements de sédiments par des organismes benthiques.

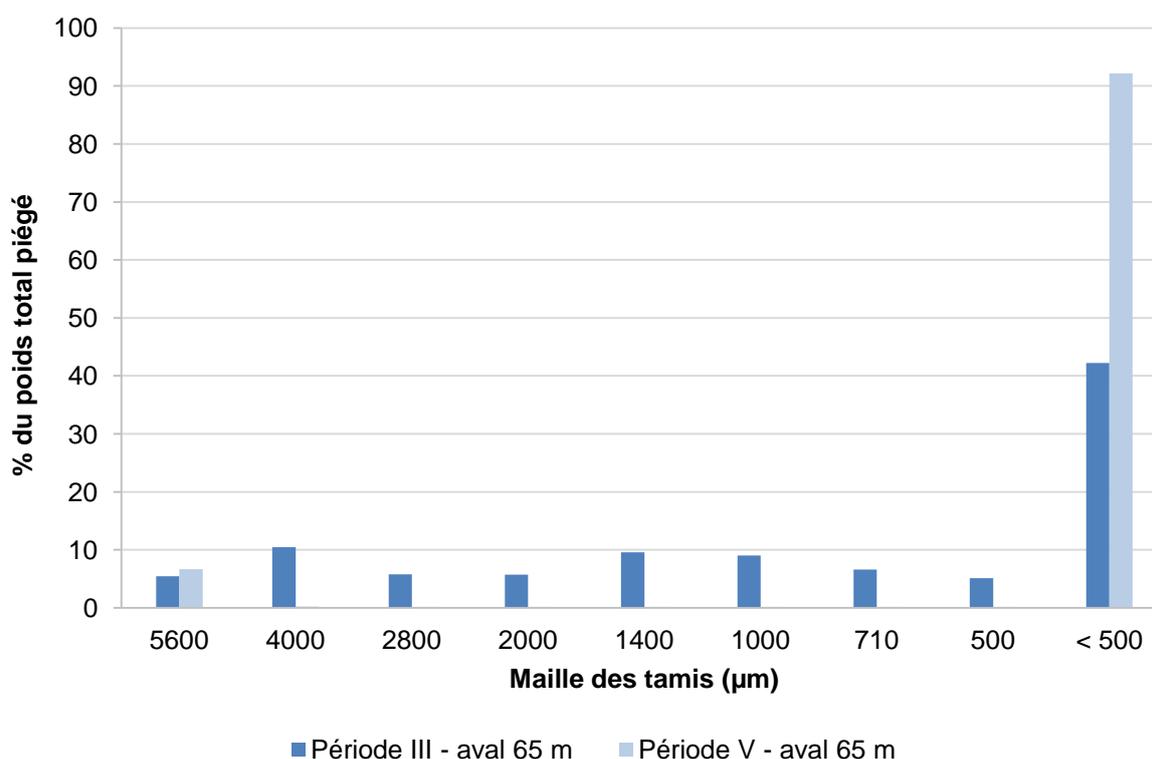


Figure 14 Différence de granularité entre les sédiments piégés dans la période III et la période V.

Tableau 8 Quantité de sédiments fins (< 2000 µm) sédimentée en kg/m<sup>2</sup>/mois, estimée d'après les pièges à sédiments. Les valeurs de la période IV, notées en rouge, sont celles résultant de la perturbation des pièges.

| réf. site   | période |      |     |     |     |     |
|-------------|---------|------|-----|-----|-----|-----|
|             | I       | II   | III | IV  | V   | VI  |
| Amont (P0)  | 6,0     | 7,5  | 2,6 | 7,5 | 6,2 | 4,4 |
| Aval (65m)  | 4,9     | 9,4  | 6,4 | 3,9 | 6,1 | 2,5 |
| Aval (150m) | 5,6     | 13,8 | 6   | 0,3 | 3,6 | 2,9 |
| Aval (290m) | 3,8     | 10,8 | 7,3 | 1,2 | 5,2 | 1,7 |

À noter que des traces de passage de sanglier dans la Sûre en amont ont été observées en 2019, ce qui pourrait fausser les valeurs de sédimentation pour le site amont si cela s'est reproduit fréquemment.

### 3.5. Effet des démantèlements sur la progression des galets piégés dans les retenues

Cent galets équipés de transpondeurs passif (PIT Tags) ont été injectés en amont du barrage 3 le 17/09/2019. La taille de ces galets varie entre 26 et 144 mm d'axe b (médiane 45 mm). Un premier relevé de la position des galets a été effectué le 22/11/2019, au cours duquel 38 % des galets ont été retrouvés. Le faible taux de récupération des galets est dû aux collisions de signaux engendrées par la proximité des galets entre eux. Les galets déployés dans la retenue du barrage 3 n'ont pas

subi de déplacements suite aux opérations de démantèlement des barrages. Il n'y a donc pas eu de charriage dans la fraction granulométrique [26 – 144] mm suite à la suppression des barrages. Un second relevé, réalisé le 07/07/2020, a mis en évidence une faible mobilisation des galets malgré une crue supérieure au débit à pleins bords ( $1,2Q_b$  le 04/04/2020). Le taux de récupération était de 48 %. Durant la période comprise entre les deux relevés, certains galets (17 %) ont été sortis du lit lors du démantèlement des nouveaux barrages de castors (curage des sédiments de la retenue le 1/07/2020)). Le nombre d'éléments communs aux deux relevés est de 11, dont 4 galets mobilisés. Le déplacement moyen atteint 1,4 m tenant compte des éléments non mobilisés et 4 m sans en tenir compte. Il faut toutefois noter qu'un galet de 26 mm d'axe b a parcouru une distance maximale de 24 m.

## 4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

La présence, et *a fortiori* l'augmentation, de sédiments fins dans les cours d'eau peut poser problème pour certaines espèces sensibles en diminuant la qualité de leur habitat ou encore en affectant leur reproduction (Denic & Geist, 2015). Dans le cas des moules d'eau douce, l'impact négatif peut être démultiplié car ces espèces nécessitent une phase de développement sur un poisson hôte pour devenir mature. C'est par exemple le cas pour *Margaritifera margaritifera* et son hôte *Salmo trutta* où les juvéniles des deux espèces ont besoin d'un substrat extrêmement bien oxygéné, donc non colmaté (Shirvell *et al.*, 1983).

Les travaux de démantèlement ont provoqué la libération de seulement 5,67 m<sup>3</sup> (sur les 616 m<sup>3</sup> estimés piégés dans les trois retenues), dont 42 % a sédimenté sur le secteur de 650 m en aval des barrages, et plus particulièrement sur les 50 premiers mètres de ce secteur. Le reste (58 %) a été emporté au-delà du dernier point d'échantillonnage. A noter qu'il est possible que des zones de sédimentation plus importante se soient créées localement dans des mouilles ou des annexes hydrauliques, qui sont caractérisées par de plus faibles vitesses de courant, favorisant ainsi la sédimentation.

La sédimentation de la fraction < 2000 µm dans le secteur étudié varie entre 3,8 et 6 kg/m<sup>2</sup>/mois lors de la période précédant les travaux de démantèlement (période I). Suite au démantèlement des barrages, elle est comprise entre 7,5 et 13,8 kg/m<sup>2</sup>/mois (période II). A titre de comparaison, Denic et Geist (2015) avancent des valeurs de 3 à 5,6 kg/m<sup>2</sup>/mois de sédimentation (pour la même fraction granulométrique) dans des cours d'eau habités par *M. margaritifera*. La sédimentation reste plus importante en aval qu'en amont lors de la période III (décembre 2019 à avril 2020). Il est probable que les débits plus importants de cette période aient permis de remettre en mouvement plus de sédiments anciennement retenus dans les barrages démantelés. En ce qui concerne *Unio crassus*, l'impact des sédimentations de fines est encore méconnu (Denic *et al.*, 2014), et il n'existe pas de valeur seuil définissant un habitat optimal pour cette espèce.

Quoiqu'il en soit, les quantités de sédiments se déposant sur le lit suite à leur mise en mouvement post-travaux ont fortement augmenté (de l'ordre de 2 à 3 fois plus importantes), ce qui peut avoir impacté l'habitat des moules. Cependant, la rapide décroissance de ces quantités transportées et le transport sur une grande distance (58 % des sédiments relâchés transportés au-delà de 2 km), permet de penser que cet impact a été relativement limité. Il est probable que les effets préjudiciables potentiels aient été évités par le choix de la période (hors cycle reproductif des espèces), par la méthode précautionneuse mise en application pour les démantèlements et par la suite par les travaux de renaturation, et par les conditions hydrologiques adéquates.

L'analyse des sticks n'a pas montré de colmatage du substrat du lit suite aux démantèlements, ce qui laisse penser que les sédiments fins n'ont pas eu le temps de s'infiltrer dans la couche caillouteuse et qu'ils ont été emportés par les forts débits

du mois de novembre. Cette tendance semble se confirmer pendant l'hiver. Les relevés suivants démontrent un colmatage plus important, en lien avec les conditions hydrologiques extrêmes (étiage prononcé).

Enfin, il apparaît que les galets marqués (PIT Tags) n'ont pas été mobilisés suite au démantèlement des barrages. La crue survenue le 5/11/2019 (11 m<sup>3</sup>/s à la station limnigraphique de Martelange) n'a pas mobilisé de galets également. Il n'y a donc pas eu de vague de sédiments grossiers en aval du site ayant pu entraîner un ensevelissement des moules ou un changement radical des faciès et des habitats aquatiques suite aux travaux de démantèlement. La crue du 4/2/2020 (38 m<sup>3</sup>/s à la station limnigraphique de Martelange) n'a pas mobilisé beaucoup de galets non plus.

Afin de mieux caractériser le remplissage des pièges il serait intéressant de caractériser les vitesses d'écoulement au droit des seuils où ils sont installés. Par ailleurs, une nouvelle mesure du volume de sédiments fins restants dans le lit de la Sûre aurait pu être réalisé car il est probable que les forts débits qui se sont produits à la suite du démantèlement (cf. figure 4) aient emporté une partie importante du stock de sédiments fins (de l'ordre de 600 m<sup>3</sup>).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Denic, M., & Geist, J. (2015). Linking stream sediment deposition and aquatic habitat quality in pearl mussel streams: implications for conservation. *River research and applications*, 31(8), 943-952.
- Denic, M., Stoeckl, K., Gum, B., & Geist, J. (2014). Physicochemical assessment of *Unio crassus* habitat quality in a small upland stream and implications for conservation. *Hydrobiologia*, 735(1), 111-122.
- Hjulstrom, F. (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, Bulletin. Geological Institute Upsalsa, 25, 221-527.
- Houbrechts, G., Hallot, E., Levecq, Y., Denis, A. C., Van Campenhout, J., Peeters, A., & Petit, F. (2013). Images CM de passega des rivières ardennaises. *BSGLg*, 61(1), 37-68.
- Houbrechts, G., Levecq, Y., Peeters, A., Hallot, E., Van Campenhout, J., Denis, A. C., & Petit, F. (2015). Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardenne, Belgium). *Geomorphology*, 251, 6-19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.012>
- Lamarre, H., Mc Vicar, B. et Roy, A.G. (2005). Using passive integrated transponder (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75 : 736-741.
- Levecq, Y., & Petit, F. (2008). *Qualité sédimentologique des fossés d'élevage de la Rulles et de l'Arlune*.
- Marmonier, P., Delettre, Y., Lefebvre, S., Guyon, J., & Boulton, A. J. (2004). A simple technique using wooden stakes to estimate vertical patterns of interstitial oxygenation in the beds of rivers. *Archiv Für Hydrobiologie*, 160(1), 133-143. <https://doi.org/10.1127/0003-9136/2004/0160-0133>
- Mols, J., & Petit, F. (2007). *Qualité sédimentologique des cours d'eau du bassin de la Rulles*.
- Passega R. (1957). Textures as characteristic of clastic deposition. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 9, 1952-1984.
- Passega R. (1964). Grain size representation by CM pattern as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34(4), 830-847.
- Peeters A., Hallot E., Houbrechts G., Levecq Y., Van Campenhout J., Denis A. et Petit F. (2013). Conception d'un outil d'aide à la décision pour la restauration hydromorphologique des masses d'eau en Région Wallonne – rapport scientifique : suivi géomorphologique. *Projet Walphy*, 132 p.
- Roche, M. (1963). *Hydrologie de Surface.*, ORSTOM. *Gauthier-Villars., Paris, 430p.*
- Shirvell C.S. & Dungey R.G. (1983). Microhabitat chosen by brown trout for feeding and spawning in rivers. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 112, 355-367.
- Van Campenhout J., Denis A.-C., Hallot E., Houbrechts G., Levecq Y., Peeters A. et Petit F (2013). Flux des sédiments en suspension dans les rivières du bassin de la Meuse : proposition d'une typologie régionale basée sur la dénudation spécifique des bassins versants, *Bull. Soc. Géog. Liège*, 61:15-36

## ANNEXES

**ANNEXE 1 : ÉPAISSEUR NON COLMATÉE DEPUIS LA SURFACE (CM) MISE ÉVIDENCE PAR LES STICKS HYPOXIES. *NA* INDIQUE L'ABSENCE DE VALEUR POUR LE STICK.**

| réf. site   | réf. stick | périodes      |          |           |          |          |          |
|-------------|------------|---------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
|             |            | I             | II       | III       | IV       | V        | VI       |
|             |            | 35 - 37 jours | 42 jours | 142 jours | 61 jours | 60 jours | 68 jours |
| Amont (P0)  | A1         | 30            | 30       | 30        | 18       | 17       | 19       |
|             | A2         | 30            | 30       | 30        | 30       | 9        | 16       |
|             | A3         | 30            | 30       | 30        | 7        | 30       | 22       |
|             | A4         | 30            | 30       | 30        | 30       | 4,5      | 14,5     |
|             | A5         | 30            | 30       | 30        | 16       | 30       | 30       |
|             | A6         | 30            | 30       | 29        | 18       | 30       | 0        |
| Aval (65m)  | B1         | 30            | 30       | 30        | 17       | 14       | 13       |
|             | B2         | 30            | 30       | 30        | 21       | 10       | 6        |
|             | B3         | 30            | 30       | 21        | 12       | 14       | 15       |
|             | B4         | 30            | 30       | > 16      | 13       | 8        | 17       |
|             | B5         | NA            | 30       | 30        | 30       | 22       | 10       |
|             | B6         | 30            | 30       | 24        | 30       | 0        | 16       |
| Aval (150m) | C1         | 17            | 30       | NA        | 30       | 14       | 30       |
|             | C2         | 30            | 30       | NA        | 30       | 18       | 30       |
|             | C3         | 13            | 13       | NA        | 16       | 30       | 8        |
|             | C4         | 30            | 30       | NA        | 7        | 30       | 7        |
|             | C5         | 24            | 18       | NA        | 18       | 16       | 13       |
|             | C6         | 30            | 16       | NA        | 18       | 19,5     | 13       |
| Aval (290m) | D1         | 6             | 13,5     | NA        | 30       | 17       | 14       |
|             | D2         | 16            | 19       | 30        | 30       | 7        | 15       |
|             | D3         | 16            | 11       | 30        | 30       | 30       | 17,5     |
|             | D4         | 6             | 18       | 12        | 26       | 12       | 13       |
|             | D5         | 6             | 30       | 14        | 14       | 13       | 18       |
|             | D6         | 8             | 30       | 25        | 11       | 4        | 13       |

**ANNEXE 2 : QUANTITÉ DE SÉDIMENTS FINS INFILTRÉS DANS LE SUBSTRAT MIS EN ÉVIDENCE PAR LES PIÈGES À SÉDIMENTS**

| période | nb de jours | fraction granulo. |                         | Amont (P0) | Aval (65m) | Aval (150m) | Aval (290m) |
|---------|-------------|-------------------|-------------------------|------------|------------|-------------|-------------|
| I       | 35 - 37     | < 500 µm          | %vide rempli/mois       | 3          | 1,7        | 2,2         | 1,7         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 1,8        | 1,1        | 1,2         | 1           |
|         |             | < 2000 µm         | %vide rempli/mois       | 3,8        | 3          | 3,7         | 2,4         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 2,3        | 1,9        | 2,2         | 1,5         |
| II      | 42          | < 500 µm          | %vide rempli/mois       | 3,1        | 4,9        | 6           | 6,1         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 1,7        | 2,9        | 3,5         | 3,2         |
|         |             | < 2000 µm         | %vide rempli/mois       | 5,3        | 6,1        | 9,1         | 7,8         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 2,9        | 3,6        | 5,3         | 4,2         |
| III     | 142         | < 500 µm          | %vide rempli/mois       | 1          | 7,5        | 8,1         | 7           |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 0,6        | 1,4        | 1,4         | 1,3         |
|         |             | < 2000 µm         | %vide rempli/mois       | 1,7        | 13         | 13,6        | 15,1        |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 1          | 2,5        | 2,3         | 2,8         |
| IV      | 61          | < 500 µm          | %vide rempli/mois       | 3,6        | 2,6        | 0,2         | 0,8         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 2          | 1,5        | 0,1         | 0,4         |
|         |             | < 2000 µm         | %vide rempli/mois       | 5,3        | 2,7        | 0,2         | 0,9         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 2,9        | 1,5        | 0,1         | 0,4         |
| V       | 60          | < 500 µm          | %vide rempli/mois       | 3,5        | 3,8        | 2,6         | 3,6         |
|         |             |                   | sédimentation/mois (mm) | 1,9        | 2,3        | 1,3         | 2           |
|         |             | < 2000 µm         | %vide rempli/mois       | 4,3        | 3,9        | 2,7         | 3,6         |

|    |    |           |                             |     |     |     |     |
|----|----|-----------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|    |    |           | sédimentation/<br>mois (mm) | 2,4 | 2,4 | 1,4 | 2   |
| VI | 68 | < 500 µm  | %vide<br>rempli/mois        | 2,4 | 1,8 | 2,3 | 1,3 |
|    |    |           | sédimentation/<br>mois (mm) | 1,2 | 1   | 1,1 | 0,6 |
|    |    | < 2000 µm | %vide<br>rempli/mois        | 3,4 | 1,8 | 2,4 | 1,3 |
|    |    |           | sédimentation/<br>mois (mm) | 1,7 | 1   | 1,1 | 0,7 |

**ANNEXE 3 : CONCENTRATION EN MES AU NIVEAU DU SITE DE RÉFÉRENCE EN 2020 (LES DÉBITS SONT CALCULÉS SUR BASE DE LA COURBE DE TARAGE (CF. § 2.2.))**

| Date       | MES au niveau du site de référence<br>amont (mg/l) | Débits (m <sup>3</sup> /s) |
|------------|--|----------------------------|
| 24/04/2020 | 4,21   | 0,198                      |
| 23/06/2020 | 4,96   | 0,086                      |
| 27/10/2020 | 4,13   | 0,131                      |